

# **Tube de Kundt : application à la caractérisation des propriétés acoustiques d'un matériau**

Version papier téléchargeable



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>I - Matériels</b>	<b>5</b>
<b>II - Principe de la méthode</b>	<b>8</b>
<b>III - Limitations de la méthode</b>	<b>9</b>
<b>IV - Rappels théoriques</b>	<b>10</b>
1. Introduction .....	10
2. Coefficient d'absorption.....	11
3. Impédance acoustique .....	12
4. Mesures en fonction de la fréquence .....	12
<b>V - Partie expérimentale</b>	<b>14</b>
1. Matériaux à étudier .....	14
2. Analyse des résultats .....	15
<b>VI - Manipulations enregistrées</b>	<b>17</b>
1. Plexiglas .....	17
1.1. fréquence 200 Hz.....	17
1.2. fréquence 250 Hz.....	17
1.3. fréquence 315 Hz.....	17
1.4. fréquence 400 Hz.....	17
1.5. fréquence 500 Hz.....	17
1.6. fréquence 630 Hz.....	17
1.7. fréquence 800 Hz.....	17
1.8. fréquence 1000 Hz.....	17
1.9. fréquence 1250 Hz.....	18
1.10. fréquence 1600 Hz.....	18
1.11. fréquence 2000 Hz.....	18
1.12. fréquence 2500 Hz.....	18
2. Bois.....	18
2.1. fréquence 200 Hz.....	18
2.2. fréquence 250 Hz.....	18
2.3. fréquence 315 Hz.....	18
2.4. fréquence 400 Hz.....	18
2.5. fréquence 500 Hz.....	18
2.6. fréquence 630 Hz.....	18
2.7. fréquence 800 Hz.....	19
2.8. fréquence 1000 Hz.....	19
2.9. fréquence 1250 Hz.....	19
2.10. fréquence 1600 Hz.....	19
2.11. fréquence 2000 Hz.....	19
2.12. fréquence 2500 Hz.....	19

3. mousse alvéolée : coté alvéoles.....	19
3.1. fréquence 200 Hz.....	19
3.2. fréquence 250 Hz.....	19
3.3. fréquence 315 Hz.....	19
3.4. fréquence 400 Hz.....	19
3.5. fréquence 500 Hz.....	20
3.6. fréquence 630 Hz.....	20
3.7. fréquence 800 Hz.....	20
3.8. fréquence 1000 Hz.....	20
3.9. fréquence 1250 Hz.....	20
3.10. fréquence 1600 Hz.....	20
3.11. fréquence 2000 Hz.....	20
3.12. fréquence 2500 Hz.....	20
4. mousse alvéolée : coté lisse .....	20
4.1. fréquence 200 Hz.....	20
4.2. fréquence 250 Hz.....	20
4.3. fréquence 315 Hz.....	21
4.4. fréquence 400 Hz.....	21
4.5. fréquence 500 Hz.....	21
4.6. fréquence 630 Hz.....	21
4.7. fréquence 800 Hz.....	21
4.8. fréquence 1000 Hz.....	21
4.9. fréquence 1250 Hz.....	21
4.10. fréquence 1600 Hz.....	21
4.11. fréquence 2000 Hz.....	21
4.12. fréquence 2500 Hz.....	21
5. moquette.....	22
5.1. fréquence 200 Hz.....	22
5.2. fréquence 250 Hz.....	22
5.3. fréquence 315 Hz.....	22
5.4. fréquence 400 Hz.....	22
5.5. fréquence 500 Hz.....	22
5.6. fréquence 630 Hz.....	22
5.7. fréquence 800 Hz.....	22
5.8. fréquence 1000 Hz.....	22
5.9. fréquence 1250 Hz.....	22
5.10. fréquence 1600 Hz.....	22
5.11. fréquence 2000 Hz.....	23
<b>VII - Animation</b>	<b>24</b>
<b>VIII - Annexe</b>	<b>25</b>

# Introduction

---



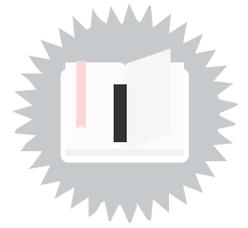
Pour optimiser les qualités acoustiques d'une salle (une église, une salle de cinéma ou de concert, un théâtre..), un moyen commode est de revêtir certaines parois de certains matériaux acoustiquement absorbants.

La grandeur physique représentative de cette qualité est le «coefficient d'absorption acoustique » noté habituellement  $\alpha$ .

Dans ce TP, on se propose de mesurer certaines caractéristiques d'absorption acoustique de quelques matériaux, à l'aide de la méthode du « tube à ondes stationnaires » ou tube de Kundt.

Cette technique est applicable à tous les matériaux acoustiques qui ne résonnent pas: les briques, le coton minéral, les matières synthétiques alvéolées...

# Matériels



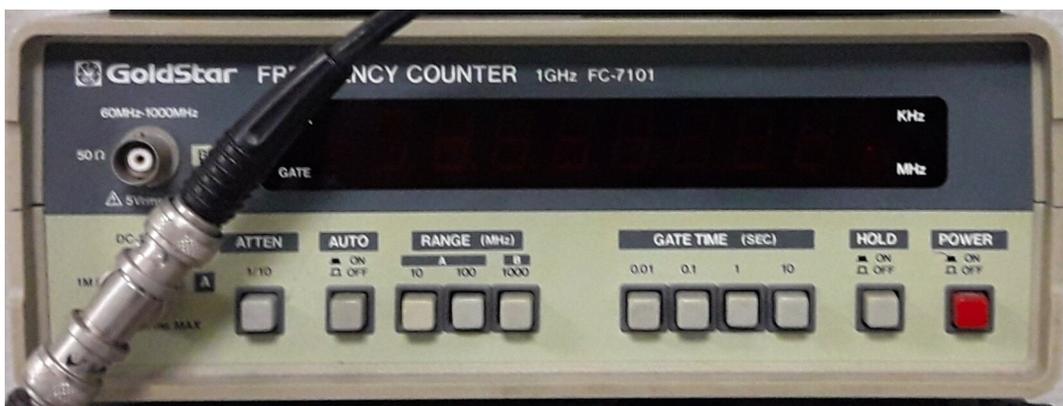
Pour réaliser cette manipulation, vous disposez :



- d'un tube de Kundt équipé d'un haut-parleur et d'un micro coulissant



- d'un générateur basse fréquence



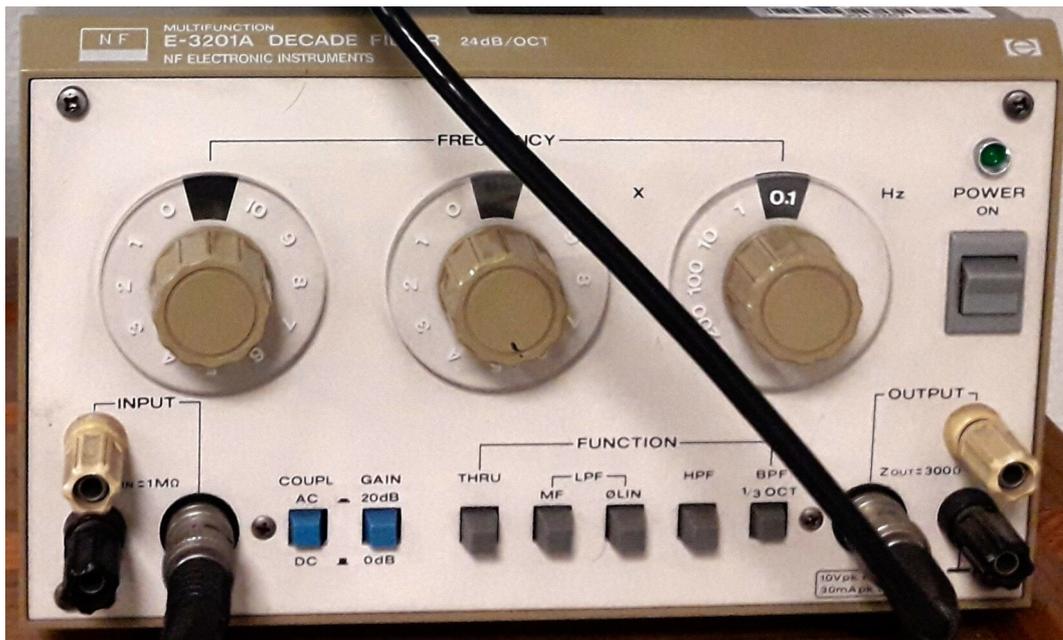
- d'un fréquencemètre



- d'un multimètre digital



- d'une alimentation microphone

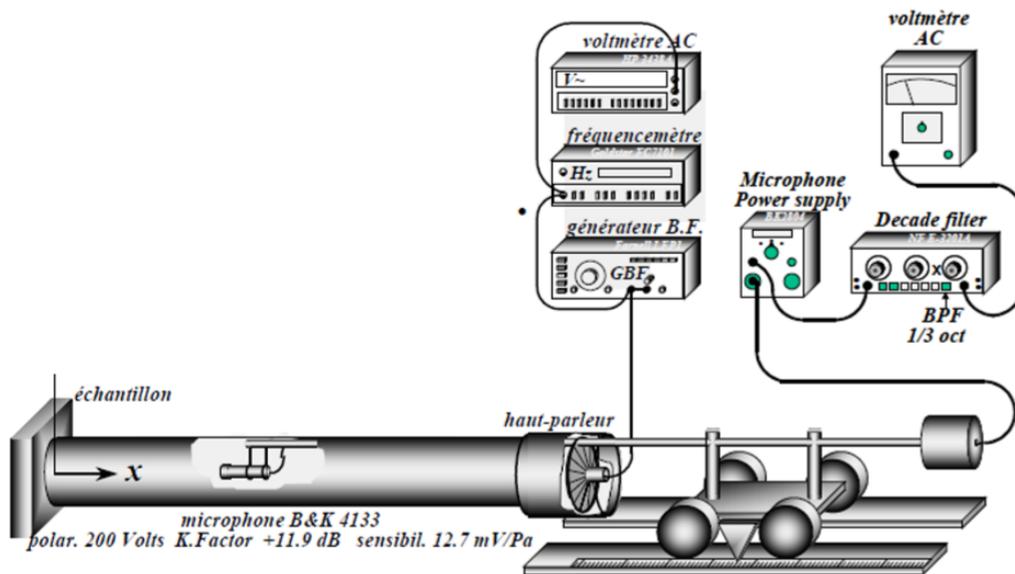


- d'un filtre à décades ajustable de 0,1 Hz à 21,800 kHz grâce à 3 boutons rotatifs :
  - celui de gauche permet un choix de 0 à 10
  - celui du centre permet un choix de 0 à 9
  - et celui de droite sert de multiplicateur par "0,1", "1", "10", "100" et "200"
- les différentes fonctions du filtre sont :
  - THRU : élimination de bande
  - LP : passe-bas
  - HP : passe-haut
  - BPF : passe-bande au 1/3 octave



- d'un millivoltmètre  
[cf. Réalisation du montage]  
Réalisation du montage

# Principe de la méthode



Le tube de Kundt (cf. figure ci-dessus) est constitué d'un tube cylindrique rempli d'air aux parois rigides construit dans un matériau dense afin de réduire les pertes acoustiques.

Un haut-parleur permettant de générer des ondes sonores est fixé à l'une des extrémités du tube acoustiquement rigide.

Un échantillon du matériau à étudier est placé à l'autre extrémité.

Une fréquence pure est appliquée au haut-parleur.

L'onde de pression sonore se propage dans le tube, se réfléchit sur l'échantillon de matériau acoustique et se propage en sens inverse: un phénomène d'ondes stationnaires s'établit.

Un microphone fixé sur une tige mobile peut être déplacé à l'intérieur du tube, longitudinalement, pour mesurer les pressions acoustiques en divers points du tube.

Le signal sortant du micro est envoyé sur un voltmètre qui permet d'accéder à la valeur efficace du signal.

De plus, une règle graduée permet de repérer la position du micro dans le tube.

Le tube étant rigide, la proportion de l'énergie qu'il absorbe est négligeable par rapport à l'énergie absorbée par l'échantillon.

En mesurant les caractéristiques des ondes stationnaires engendrées, on détermine les propriétés acoustiques du matériau :

- en mesurant le rapport entre le maximum et le minimum de pression dans le tube, on peut calculer le coefficient d'absorption acoustique,  $\alpha$ , qui donne la proportion d'énergie incidente absorbée par le matériau.
- en mesurant la distance entre la surface de l'échantillon et les minima et maxima de pression, on peut calculer l'impédance acoustique du matériau absorbant, notée ici  $Z$ , le rapport complexe entre la pression acoustique et la vitesse des particules à la surface du matériau.

# Limitations de la méthode

---



1. la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde sonore doit être inférieure à 2 fois la longueur du tube, pour que le phénomène d'ondes stationnaires puisse s'établir
2. la longueur d'onde  $\lambda$  doit être supérieure à environ 1,7 fois le diamètre du tube, pour qu'un régime d'ondes planes, ou presque planes, puisse s'établir, en évitant les effets de guide d'onde

## Calculs préliminaires :



A partir des dimensions du tube, déterminer la bande de fréquence sur laquelle le tube est utilisable.

Note : Vous pouvez calculer la vitesse du son dans l'air à l'aide de la relation :

$$c = 20,16 \sqrt{T} \text{ avec } T = \text{température en Kelvin}$$



# Rappels théoriques

## 1. Introduction

Soit, en un point M du tube où on a superposition d'une onde incidente et d'une onde réfléchi :

- $P_i$  la pression acoustique (complexe) de l'onde incidente qui désigne la composante se propageant dans le sens des x décroissant :

$$P_i = A_i \cdot e^{j(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda})} \text{ eq (1)}$$

- $P_r$  la pression de l'onde partiellement réfléchi par le matériau

$$P_r = A_r \cdot e^{j\Phi} e^{j(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda})} \text{ eq (2)}$$

où  $\Phi$  représente le retard de phase introduit lors de la réflexion de l'onde sur le matériau.

Le coefficient de réflexion en pression,  $r$ , du matériau absorbant situé à  $x = 0$ , est une grandeur complexe qui tient compte du déphasage de l'onde  $\Phi$  apporté par la réflexion sur le fond du tube :

$$r = \frac{P_r(x=0)}{P_i(x=0)} = \frac{A_r}{A_i} e^{j\Phi} = r_0 \cdot e^{j\Phi} \text{ eq (3)}$$

- $P$  la pression résultante au point M :

$$P = P_i + P_r = (A_i \cdot e^{j(\frac{2\pi x}{\lambda})} + A_r \cdot e^{j\Phi} e^{j(-\frac{2\pi x}{\lambda})}) e^{j\omega t} \text{ eq (4)}$$



Montrer que l'amplitude réelle (correspondant au module de l'expression complexe) de cette onde est :

$$|P| = A_i \sqrt{1 + r_0^2 + 2r_0 \cos(\Phi - \frac{4\pi x}{\lambda})} \text{ eq (5)}$$

L'onde de pression sonore dans le tube présente donc des minima d'amplitude ((appelés aussi « nœuds de pression »), :

$$P_{min} = A_i(1 - r_0)$$

pour les valeurs de x :

$$\Phi - \frac{4\pi x}{\lambda} = (2k + 1)\pi \text{ eq (6)}$$

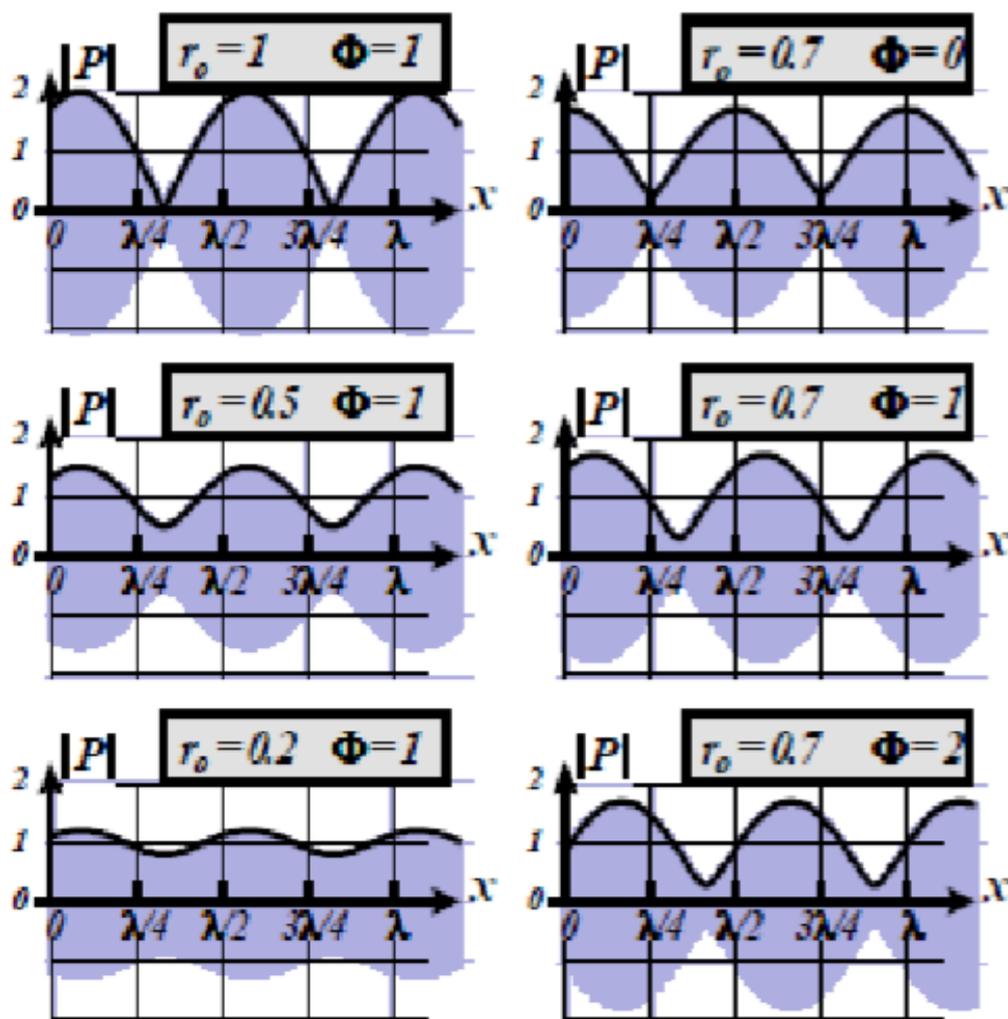
et des maxima d'amplitude ( ventres de pression ),

$$P_{max} = A_i(1 + r_0)$$

pour les valeurs de x :

$$\Phi - \frac{4\pi x}{\lambda} = 2k\pi \text{ eq (7)}$$

(k étant un nombre entier).



Le taux d'ondes stationnaires (TOS) est défini par :

$$TOS = \frac{P_{Max}}{P_{min}} = \frac{1 + r_0}{1 - r_0}$$

## 2. Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption acoustique est le rapport de la puissance absorbée par le matériau à la puissance acoustique incidente.

Sous incidence normale, le coefficient d'absorption  $\alpha$  est lié au coefficient de réflexion en pression par la relation :

$$\alpha = 1 - r_0^2 \text{ eq (9)}$$

Le dispositif expérimental permet :

- de mesurer les positions  $x_{Max}$  et  $x_{min}$  des pressions sonores maximum et minimum (fonction de  $\lambda$  et  $\phi$ )
- de mesurer les pressions sonores maximum et minimum,  $P_{Max}$  et  $P_{min}$

Montrer que la distance séparant deux ventres ( $d_{vv}$ ) ou deux nœuds ( $d_{nn}$ ) consécutifs est égale à une demi-longueur d'onde ( $\lambda/2$ ).

$$(d_{vv} = |x_{k+1} - x_k| = \frac{\lambda}{2})$$

 Montrer que le module du coefficient de réflexion en pression,  $r_0$ , peut être déterminé à partir du taux d'ondes stationnaires (TOS).

$$r_0 = \frac{TOS - 1}{TOS + 1}$$

### 3. Impédance acoustique

L'impédance acoustique d'un milieu est définie comme le rapport entre la pression acoustique et la vitesse de vibration des particules du milieu normale à la surface de l'échantillon.

C'est une grandeur complexe. L'impédance de l'air est égale à  $z_{air}$  où  $\rho_0$  est la masse volumique de l'air.

Sa valeur est  $Z_{air} = 415 \text{ Rayls}$  pour l'air à 20°C.

L'impédance acoustique complexe du matériau,  $Z$ , est donné par la relation suivante :

$$Z = \frac{1 + r}{1 - r} c \rho_0 = z c \rho_0$$

avec  $r = r_0 \cdot e^{j\phi}$

$$\text{et } z = \frac{1 + r}{1 - r}$$

Connaissant le module du coefficient de réflexion en pression,  $r_0$ , il reste à déterminer le facteur de déphasage  $\phi$  créé lors de la réflexion de l'onde sonore sur le matériau.

Pour cela nous pouvons utiliser la position des deux premiers minima consécutifs de pression sonore.

 Montrer que :

- la partie réelle de  $z$  est :  $Re(z) = \frac{1 - r_0^2}{1 + r_0^2 - 2r_0 \cdot \cos(\phi)}$  eq (10)

- la partie imaginaire de  $z$  est :  $Im(z) = \frac{2 \cdot r_0 \sin(\phi)}{1 + r_0^2 - 2r_0 \cdot \cos(\phi)}$  eq (11)

 Montrer que si on mesure les positions  $x_{min,0}$  et  $x_{min,1}$  du premier minimum de pression sonore à partir de la surface de l'échantillon (donc pour  $k=0$  dans eq (6)) et du deuxième minimum (pour  $k=1$ ), nous pouvons calculer  $\phi$  à partir de l'expression :

$$\phi = \pi \cdot \left( 1 + \frac{2x_{min,0}}{x_{min,0} - x_{min,1}} \right)$$

### 4. Mesures en fonction de la fréquence

Les applications industrielles concernant ce TP nécessitent de quantifier les performances acoustiques de matériaux dans des gammes de fréquences spécifiques du domaine de l'acoustique audible (fréquences comprises entre 20 Hz et 20000 Hz).

Les secteurs concernés sont, par exemple, l'architecture immobilière (habitat, salles de spectacles, usines, ...), mais aussi l'aéronautique ou l'automobile où les isolations acoustiques sont de plus en plus prises en considération pour le confort des usagers.

Pour comparer les performances acoustiques des matériaux, les mesures sont normalement effectuées par intervalles de fréquences appelés octaves et tiers d'octaves.

	Fréquences (Hz)																	
1/3 d'octave	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
octave	125		250			500		1000		2000			4000					

# Partie expérimentale



A l'aide du dispositif expérimental proposé, on souhaite mesurer la longueur d'onde  $\lambda$ , des ondes acoustiques, le déphasage  $\phi$  à la réflexion, le coefficient de réflexion complexe et son module  $r_0$ , le coefficient d'absorption  $\alpha$  de différents matériaux et la vitesse du son dans l'air, c.

## 1. Matériaux à étudier

Les matériaux à étudier sont:

1. **Plastique**
2. **Mousse alvéolée (côté lisse et côté alvéolée)**
3. **Mousse de polyuréthane.**

### Manipulation :

- Placer l'échantillon à tester à l'extrémité du tube. On étudie d'abord l'échantillon de plastique dur.

Dans un essai réel, il serait recommandé de coller l'échantillon et d'assurer l'étanchéité sur son périmètre, ce qui ne sera pas réalisé ici pour des raisons évidentes.

**Note 1:** N'écrasez pas l'échantillon en mousse afin de conserver son épaisseur. Ne modifiez pas le niveau de tension du générateur, par rapport au niveau réglé lors des mesures avec la terminaison rigide.

- Effectuer les mesures pour des fréquences du GBF comprises entre environ  $300\text{Hz}$  et  $2000\text{Hz}$  par pas de tiers d'octave.

On déplacera le chariot support de la tige microphone et on repérera la position du microphone par rapport à l'échelle graduée comme indiquée dans la vidéo suivante :

[cf. Mode opératoire]

**Note 2 :** Pour ces mesures et toutes les suivantes penser impérativement à ajuster la fréquence du filtre à décade NF E-3201A à la fréquence du signal engendré par le générateur BF sur la position BPF 1/3 OCT du filtre.



- Mesurer l'évolution  $P(x)$  de la pression sonore le long du tube :  
relever les positions des maxima  $x_{Max}$  et des minima  $x_{min}$ , ainsi que leurs valeurs des pressions sonores maximum et minimum  $P_{Max}$  et  $P_{min}$ .

**Note 3:** les pressions sonores sont mesurées par le millivoltmètre AC, exprimées en millivolts.

Eventuellement, ces pressions sonores pourront être exprimées en Pascal grâce à la sensibilité du microphone: 12,7 millivolts par Pascal.

Mais cela ne sera pas strictement nécessaire ici, puisqu'il n'est utile de calculer que le rapport des pressions sonore, le Taux d'ondes stationnaires.

Il est utile pour la suite de noter clairement, dans un tableau de mesures, les conditions de l'expérience, les mesures de pressions sonores et les positions du microphone.

Exemple de tableau de mesures:

Mousse polyuréthane	Sortie du générateur BF: 0,025 Volts ; Gain du filtre NFE3201A : 20 dB					
fréquence (Hz)	$U_{min} ; x_{min}$	$U_{Max} ; x_{Max}$	$U_{min} ; x_{min}$	$U_{Max} ; x_{Max}$	$U_{min} ; x_{min}$	$U_{Max} ; x_{Max}$
500	2 mV 30,2 cm	..	..	...	..	..
....	...	...	..	...	..	..

**Note :** Pour une fréquence excitatrice, la mesure de plusieurs maximums et minimums permettra de calculer une valeur moyenne de la longueur d'onde  $\lambda$  et donc de la vitesse du son  $c$ .

## 2. Analyse des résultats

1- Calculer les coefficients d'absorption pour les différents matériaux.

Détailler les calculs en les présentant sous forme de tableau.

Exemple de tableau de données:

plastique	$U_{max}$ (mV)	$U_{min}$ (mV)	TOS	$r_0$	$r_0^2$	$\alpha = 1 - r_0^2$
500 Hz						
630 Hz						
..						

2- Tracer sur un même graphe les coefficients d'absorption des différents matériaux en fonction de la fréquence.

Que pouvez-vous conclure sur l'absorption d'une onde sonore par un matériau (nature du matériau, domaine de fréquence,...).

Citer des exemples de la vie courante utilisant ces propriétés.

3- Calculer l'impédance acoustique ( $Re(Z)$ ,  $Im(Z)$  et  $|Z|$ ) des différents échantillons.

Détailler les calculs en les présentant sous forme de tableau.

Comparer les valeurs calculées de  $Re(z)$ ,  $Im(z)$  avec Excel et les valeurs calculées à l'aide de l'Abaque de Smith.

Exemple de tableau de données:

Mousse alvéolée (côté lisse)					Excel		Abaque de Smith		$Z = zc\rho_0$
$f$ (Hz)	$x_{\min,0}$ (cm)	$x_{\min,1}$ (cm)	$\phi$ (rad)	$r_0$	$Re(z)$	$Im(z)$	$Im(z)$	$Re(z)$	$ Z $ (Rayls)
500									
..									

4- Tracer sur un même graphe le module de l'impédance acoustique ( $|Z|$ ) des différents matériaux en fonction de la fréquence.

Commentez vos résultats.

5- Calculer la longueur d'onde et la vitesse du son  $c$ .

Tracer sur un graphe  $\lambda$  en fonction de  $1/\text{fréquence excitatrice}$ .

Tracer  $c$  en fonction de la fréquence excitatrice.

Conclure.

Exemple de tableau de données:

Plastique dur								
fréquence (Hz)	$x_{\min,0}$ (cm)	$x_{\min,1}$ (cm)	$x_{\max,0}$ (cm)	$x_{\max,1}$ (cm)	$d_{vv}$ (cm)	$d_{nn}$ (cm)	$\bar{\lambda} \pm \Delta\lambda$ (m)	$c$ (m/s)
500								
..								

# Manipulations enregistrées

---



## 1. Plexiglas

### 1.1. fréquence 200 Hz

[cf. ]

plexiglas fréquence 200 Hz

### 1.2. fréquence 250 Hz

[cf. plexiglas\_250Hz]

plexiglas fréquence 250 Hz

### 1.3. fréquence 315 Hz

[cf. plexiglas\_315Hz]

plexiglas fréquence 315 Hz

### 1.4. fréquence 400 Hz

[cf. plexiglas\_400Hz]

plexiglas fréquence 400 Hz

### 1.5. fréquence 500 Hz

[cf. plexiglas\_500Hz]

plexiglas fréquence 500 Hz

### 1.6. fréquence 630 Hz

[cf. plexiglas\_630Hz]

plexiglas fréquence 630 Hz

### 1.7. fréquence 800 Hz

[cf. plexiglas\_800Hz]

plexiglas fréquence 800 Hz

### 1.8. fréquence 1000 Hz

[cf. plexiglas\_1000Hz]

plexiglas fréquence 1000 Hz

### **1.9. fréquence 1250 Hz**

[cf. plexiglas\_1250Hz]

plexiglas fréquence 1250 Hz

### **1.10. fréquence 1600 Hz**

[cf. plexiglas\_1600Hz]

plexiglas fréquence 1600 Hz

### **1.11. fréquence 2000 Hz**

[cf. plexiglas\_2000Hz]

plexiglas fréquence 2000 Hz

### **1.12. fréquence 2500 Hz**

[cf. plexiglas\_2500Hz]

plexiglas fréquence 2500 Hz

## **2. Bois**

### **2.1. fréquence 200 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 200 Hz

### **2.2. fréquence 250 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 250 Hz

### **2.3. fréquence 315 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 315 Hz

### **2.4. fréquence 400 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 400 Hz

### **2.5. fréquence 500 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 500 Hz

### **2.6. fréquence 630 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 630 Hz

## **2.7. fréquence 800 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 800 Hz

## **2.8. fréquence 1000 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 1000 Hz

## **2.9. fréquence 1250 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 1250 Hz

## **2.10. fréquence 1600 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 1600 Hz

## **2.11. fréquence 2000 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 2000 Hz

## **2.12. fréquence 2500 Hz**

[cf. ]

bois fréquence 2500 Hz

## **3. mousse alvéolée : coté alvéoles**

### **3.1. fréquence 200 Hz**

[cf. ]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 200 Hz

### **3.2. fréquence 250 Hz**

[cf. ]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 250 Hz

### **3.3. fréquence 315 Hz**

[cf. ]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 315 Hz

### **3.4. fréquence 400 Hz**

[cf. ]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 400 Hz

### **3.5. fréquence 500 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 500 Hz

### **3.6. fréquence 630 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 630 Hz

### **3.7. fréquence 800 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 800 Hz

### **3.8. fréquence 1000 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 1000 Hz

### **3.9. fréquence 1250 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 1250 Hz

### **3.10. fréquence 1600 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 1600 Hz

### **3.11. fréquence 2000 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 2000 Hz

### **3.12. fréquence 2500 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté alvéoles fréquence 2500 Hz

## **4. mousse alvéolée : coté lisse**

### **4.1. fréquence 200 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 200 Hz

### **4.2. fréquence 250 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 250 Hz

### **4.3. fréquence 315 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 315 Hz

### **4.4. fréquence 400 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 400 Hz

### **4.5. fréquence 500 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 500 Hz

### **4.6. fréquence 630 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 630 Hz

### **4.7. fréquence 800 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 800 Hz

### **4.8. fréquence 1000 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 1000 Hz

### **4.9. fréquence 1250 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 1250 Hz

### **4.10. fréquence 1600 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 1600 Hz

### **4.11. fréquence 2000 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 2000 Hz

### **4.12. fréquence 2500 Hz**

[cf.]

mousse alvéolée : coté lisse fréquence 2500 Hz

## **5. moquette**

### **5.1. fréquence 200 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 200 Hz

### **5.2. fréquence 250 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 250 Hz

### **5.3. fréquence 315 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 315 Hz

### **5.4. fréquence 400 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 400 Hz

### **5.5. fréquence 500 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 500 Hz

### **5.6. fréquence 630 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 630 Hz

### **5.7. fréquence 800 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 800 Hz

### **5.8. fréquence 1000 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 1000 Hz

### **5.9. fréquence 1250 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 1250 Hz

### **5.10. fréquence 1600 Hz**

[cf.]

moquette fréquence 1600 Hz

## **5.11. fréquence 2000 Hz**

[cf. ]

moquette fréquence 2000 Hz

# Animation

---



[cf. Tube de Kundt : réflexion sur un matériau]

animation en ligne sur le site Geogebra :

<https://www.geogebra.org/m/hkq4mayc>

La partie réelle et imaginaire de  $z$  (eq (10) et eq (11)) peut être calculée à l'aide de l'Abaque de Smith, ci-joint, permettant de vérifier les valeurs calculées à l'aide d'une calculatrice (ou Excel).

Pour utiliser l'Abaque de Smith :

- Tracer le rayon matérialisant l'angle de phase  $\phi$  calculé
- Reporter, à partir du centre, la valeur de  $r_0$  en fonction de l'échelle située en bas de l'abaque
- Le point placé ainsi sur le réseau de courbes permet de lire  $Re(z)$  et  $Im(z)$

### Abaque de Smith pour le calcul de l'impédance acoustique:

Cercle des réels:  $x_c = \frac{r_0}{r_0 + 1}$        $y_c = \theta$        $R = \frac{1}{r_0 + 1}$

Cercle des imaginaires:  $x_c = 1$        $y_c = \frac{1}{im}$        $R = \frac{1}{im}$

Exemple  $\phi = 59^\circ$      $r_0 = 0,66$   
 $\alpha$      $Re = 0,75$      $Im = 1,50$

